اثر CFRP بر رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح★

ابوالفضل عربزاده[۱] اصغر امانی داشلجه[۲] ایرج محمودزاده کنی[۳] سعید اینانلو[٤]

چکیده *تیرهای عمیق، به‌دلیل داشتن هندسهٔ خاص، دارای رفتاری متفاوت از تیرهای معمولی هستند و تحقیقات گسترده‌ای توسط محققان مختلف بر روی رفتار آنها صورت گرفته است. در این مقاله بحث مقاوم‌سازی این تیرها با الیاف پلیمری کربنی (CFRP) به‌صورت آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته و با آزمایش بر روی ۱۰ نمونه، در مورد نحوهٔ مقاوم‌سازی آنها بحث شده است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که استفاده از باندهای CFRP در جهت عمود بر ترک‌های قطری در شرایطی مناسب‌تر از استفاده از CFRP قائم می‌باشد که به‌جای استفاده از تعداد CFRP کمتر با عرض زیاد، از باند بیشتر با عرض کمتر استفاده شود. همچنین مقایسه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج به‌دست آمده از روابط موجود در منابع صورت گرفته است که نشان می‌دهد روابط موجود نمی‌توانند پیش‌بینی صحیحی را از رفتار و بار نهایی تیرهای عمیق مقاوم‌شده با FRP در این مقاله ارائه نمایند.*

واژه‌های کلیدی تیر عمیق؛ بتن مسلح؛ الیاف پلیمری کربنی.

CFRP Eeffects on Reinforced Concrete Deep Beams

A. Arabzadeh   A. Amani Dashlejeh   I. Mahmoudzade K. Saeed Inanloo

Abstract *Deep beams are type of beams which their behavior is different from conventional beams because of their particular type of geometry. In this paper, the retrofitting of these beams is considered and 10 deep beams are tested experimentally and discussed about retrofitting methods. Experimental studies indicate that the use of CFRP bands in the direction perpendicular to diagonal cracks in comparison with the use of CFRP in vertical direction are appropriate in condition that many CFRP with less width be used instead of using wide CFRP with lower number. The comparison of the experimental results is conducted with the results of existing relations in literature. The comparison shows that the existing relations cannot correctly predict the behavior and ultimate load of deep beams retrofitted by FRP tested in this paper.*

Keywords Deep Beam; Reinforced Concrete; Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP).

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۲/٤/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹٤/۸/٦ می‌باشد

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

(۲) دانشجوی دکترای عمران، گرایش سازه، دانشگاه تربیت مدرس.

(۳) استاد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

(٤) کارشناس آزمایشگاه سازه، دانشگاه تربیت مدرس.

مقدمه

تیرها جزو اعضای اصلی در سازه‌های بتن مسلح محسوب می‌شوند و توجه به تحلیل و طراحی صحیح آنها از عوامل تأثیرگذار در پیش‌بینی رفتار درست سازه می‌باشد. در سازه‌هایی مانند ساختمان‌های بلند، شاه‌تیر پلها و سازه‌های دریایی حالتی به‌وجود می‌آید که در آن نسبت طول به ارتفاع تیر به‌گونه‌ای می‌گردد که فرض توزیع خطی تنش و کرنش در مقطع تیر حاکم نمی‌شود. به این‌گونه از تیرها، تیرهای عمیق گفته می‌شود. در این شرایط رفتار تیر متفاوت از رفتار تیرهای معمولی می‌شود و در بیشتر مواقع، برش حاکم می‌شود.

از دهۀ ٦٠ میلادی مطالعات بر روی تیرهای عمیق به‌صورت گسترده‌ای آغاز شده و بررسی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی فراوانی صورت گرفته و روابط گوناگونی برمبنای روش‌های مختلف برای تحلیل و طراحی این تیرها ارائه گردیده است.

در سال‌های اخیر بحث مقاوم‌سازی اعضای بتن مسلح با الیاف FRP مورد توجه قرار گرفته و مشابه چنین مطالعاتی در مورد تیرهای عمیق نیز انجام شده است. تحقیق‌های صورت گرفته توسط شلال و همکاران [1] و فانینگ و کلی [2] یکی از اولین کارها در این زمینه است. این تحقیقات با کار ژانگ و همکاران [3] ادامه یافته‌اند که در آن برای بررسی رفتار برشی تیرهای عمیق تقویت شده در دو وجه تیر با نوار FRP تحت زاویه‌های مختلف، ١٦ تیر عمیق بدون آرماتور برشی فولادی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج تحقیق حاکی از بهبود رفتار برشی تیرها بوده است و عنوان شده است که مقدار این افزایش به نحوۀ قرارگیری ژاکت‌ها و شکل آنها بستگی دارد. هم‌چنین یک روش تحلیل و طراحی نیز برای مطالعۀ این تیرها توسط ژانگ و همکاران ارائه شده است. ایسلام و همکاران [4] با انجام کار مشابهی، ٦ تیر عمیقی را که دارای کمبود آرماتور بودند، مورد آزمایش قرار دادند تا به نوع تقویت بهینه توسط FRP دو جهته دست یابند. آنها از آزمایش خود به این نتیجه رسیدند که استفاده از شبکه‌های دوجهته FRP بهترین آرایش برای تقویت تیرهای عمیق می‌باشد. مطالعۀ تیرهای عمیق تقویت شده با FRP با تحقیقات پروین و مصلحی[5]، احمد و همکاران [6]، اممان و همکاران [7]، معادوی و شریف [٨] ادامه یافته است.

پارک و ابوطاها [9] مدل خرپایی (Strut (STM) and Tie Model) برای تیرهای عمیق مقاوم شده با نوار FRP ارائه دادند. فرآیند STM پیشنهادی یک فرآیند تکراری بود که با انتخاب خط مرکزی مدل خرپایی شروع می‌شد و نوارهای FRP چسبیده، به‌عنوان عضو کششی اضافی در مدل STM درنظر گرفته می‌شد. در محاسبۀ نیروی اعضای کششی، نیروهای اعضای کششی فولادی و CFRP به نسبت ١ و ۰/۷۵ با هم ترکیب می‌شد. کم در نظر گرفتن نیروی مربوط به FRP به‌خاطر جداشدگی از بتن قبل از رسیدن به مقاومت نهایی می‌باشد. ١٧ تیر عمیق آزمایش شده توسط شلال و همکاران [1] و فانینگ و کلی [2] با استفاده از فرآیند STM پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت.

لی و همکاران [10] رفتار ١٤ تیر عمیق T شکل مقاوم‌شده با ورق‌های CFRP تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای مهم مورد مطالعه عبارت بودند از طول مقاوم‌شدگی، ترکیب امتداد الیاف ورق‌های CFRP و مهار با استفاده از ورق‌های U شکل CFRP. نمونه‌های مورد نظر نسبت دهانه به عمق مؤثر ١/٢٢ داشتند و در برش دارای کمبود بودند. از نتایج آزمایش‌ها به این نتیجه رسیده شد که متغیرهای طول مقاوم‌شدگی، ترکیب امتداد الیاف و مهار تأثیر عمده‌ای بر عملکرد برشی تیرهای عمیق مقاوم‌شده دارند.

آندرمات [11] به بررسی رفتار برشی ١٢ تیر عمیق بزرگ مقیاس بتن مسلح تقویت شده با میلگرد FRP بدون آرماتور جان و نحوۀ مدل‌سازی آن پرداخت. متغیرهای اصلی شامل نسبت دهانۀ برش خالص(a) به

ارتفاع مفید(d)، نسبت آرماتور، ارتفاع عضو و مقاومت بتن بودند. نتایج نشان داد که مکانیسم قوسی قادر به تشکیل در تیرهای بتن مسلح بـا FRP دارای $\frac{a}{d} \leq$ ۲/۱ می‌باشد.

در مجموع می‌توان گفت که تعداد مطالعات انجام شده بر روی تیرهای عمیق مقاوم‌شده با FRP به‌مراتب کمتر از مطالعات در مورد تیرهای معمولی است. از آن‌جایی که مقاوم‌سازی پل‌ها با FRP در سال‌های اخیر از مهم‌ترین موارد کاربرد این مواد در مهندسی عمران بوده است و معمولاً شاه‌تیرها دارای رفتاری مشابه تیرهای عمیق هستند، بررسی و مطالعهٔ بیشتر در زمینهٔ مقاوم‌سازی تیرهای عمیق با FRP مورد نیاز است. در این مقاله، چنین مطالعه‌ای به‌صورت آزمایشگاهی صورت گرفته و حالت‌هایی از مقاوم‌سازی فرض گردیده که در مطالعات قبلی مدنظر قرار نگرفته است. در این تحقیق از بتن با مقاومت بالای ۴۰ MPa و CFRP یک‌جهته استفاده شده و چندین آرایش از FRP مورد بررسی قرار گرفته است.

رفتار تیرهای عمیق

جزئیات آرماتورگذاری و مصالح. برای بررسی رفتار تیرهای عمیق، ۱۰ تیر عمیق دو سر ساده در آزمایشگاه ساخته شده و در سه گروه طبقه‌بندی شده‌اند. گروه اول تیرهای عمیق با دو سفرهٔ آرماتور و با ضخامت ۱۰cm، گروه دوم تیرهای عمیق به ضخامت ۱۰cm و با یک سفرهٔ آرماتور و گروه سوم تیرهای عمیق با ضخامت ۱٤cm و دو سفرهٔ آرماتور. دهانهٔ خالص تمامی نمونه‌ها ۸۰cm و ارتفاع آنها ٤۰cm و به عبارتی نسبت طول به ارتفاع ۲ درنظر گرفته شده است. انتخاب این نسبت به‌دلیل هم‌خوانی با تمامی آیین‌نامه‌های موجود صورت گرفته است. میزان پوشش بتن در بالا و پایین نمونه‌ها ٤cm می‌باشد.

آرماتورگذاری نمونه‌ها بدین صورت می‌باشد که گروه اول طبق روابط موجود مبحث نهم مقررات ملی [۱۲] برای بار خمشی حدود ۳۰۰ kN طراحی شده‌اند و آرماتورهای برشی جان در چشمه‌های ۱۰cm قرار داده شده‌اند. از حذف یک سفره آرماتور از کل آرماتورها، نمونه‌های گروه دوم ساخته شده‌اند. دلیل حذف یک سفره از آرماتورها ایجاد نمونه‌ها با ضعف خمشی است. نمونه‌های گروه دوم دارای جزئیاتی مشابه گروه اول ولی با یک سفره آرماتور کمتر می‌باشند. حذف یک سفره آرماتور در این گروه باعث ضعف خمشی و برشی آن می‌شود ولی به دلیل ثابت ماندن ضخامت بتن، مقاومت خمشی تیر بیشتر از مقاومت برشی کاهش می‌یابد. در گروه سوم برای افزایش پوشش بتن روی میلگردها، ضخامت نمونه افزایش یافته است و آرماتورهای خمشی آن نیز برای بار ۵۵۰kN طراحی شده‌اند. جزئیات آرماتوربندی هر یک از گروه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. تمامی ابعاد نشان داده شده بر روی شکل برحسب mm می‌باشند.



شکل ۱ جزئیات آرماتورگذاری و تقویت‌های صورت گرفته در محل اعمال بار و تکیه‌گاه‌ها برای جلوگیری از وقوع خرابی لهیدگی تکیه‌گاهی

جدول ۱ جزئیات نمونه‌های مورد آزمایش

گروه	نام نمونه	جزئیات
اول	B1	تیر عمیق بتن‌مسلح به ضخامت ۱۰ cm با دو سفره آرماتور با دو آرماتور کششی نمره ۱۸
	B2	تیر عمیق بتن مسلح به ضخامت ۱۰ cm با دو سفره آرماتور با چهار آرماتور کششی نمره ۱۸
	BR1	B1 + تقویت با CFRP در راستای عمود بر ترک قطری در دو وجه تیر در ناحیهٔ جان تیر با چهار نوار به عرض ۱۰ cm در دو وجه تیر
	BR2	B1 + تقویت با CFRP در راستای عمود بر ترک قطری در یک وجه تیر در ناحیه جان و بال تیر با دو نوار به عرض ۱۰ cm
دوم	B3	تیر عمیق بتن‌مسلح به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر با یک سفرهٔ آرماتور
	BR3	B3 + تقویت با CFRP در راستای عمود بر ترک قطری در دو وجه تیر در ناحیهٔ جان تیر با چهار نوار به عرض ۱۰ cm در دو وجه تیر
	BR4	B3 + تقویت با CFRP در راستای عمود بر ترک قطری در یک وجه تیر در ناحیهٔ جان و بال تیر با دو نوار به عرض ۱۰ cm
سوم	B4	تیر عمیق بتن مسلح به ضخامت ١٤ cm با دو سفرهٔ آرماتور با دو آرماتور کششی نمره ۲۰ و دو آرماتور کششی نمره ۱۸
	BR5	B4 + تقویت با CFRP یو شکل در دهانهٔ برشی تیر
	BR6	B4 + تقویت با CFRP در راستای عمود بر ترک قطری در یک وجه تیر در ناحیهٔ جان و بال تیر با ۱۰ نوار به عرض ۵ cm

در محل اعمال بار و تکیه‌گاه‌ها، آرماتورها و نشیمن‌گاه‌هایی اضافه شده است تا از وقوع خرابی در اثر لهیدگی محل اعمال بار یا تکیه‌گاه‌ها جلوگیری شود. این نشیمن‌گاه‌ها شامل ورق‌هایی به طول ۱۵ cm و ضخامت ۱ cm می‌باشد و دارای عرضی برابر با ضخامت نمونه‌هاست. بر روی این نشیمن‌گاه‌ها دو میلگرد نمره ٦ به‌صورت U شکل جوش شده است. این آرماتورها و نشیمن‌گاهها همانند شکل (۱) در نمونه‌ها اضافه شده‌اند.

برای نام‌گذاری نمونه‌های ساده از حرف B و نمونه‌های مقاوم‌شده با CFRP از حروف BR استفاده شده است. نام نمونه‌ها به‌همراه توضیحات آنها در جدول (۱) و مقطع تیرهای آزمایش شده در شکل (۲) نشان داده شده است.

طرح اختلاط بتن بر مبنای حداقل مقاومت استوانه‌ای ٤۰ MPa تعیین شده و در آن از فوق روان‌کننده (Naphthalene Sulfonate Formaldehyde) NSF برای کارایی بهتر نمونه بهره گرفته شده است. در جدول شمارهٔ ۲ مقادیر هر یک از مصالح بتن برای تهیهٔ یک مترمکعب آورده شده است. نسبت آب به سیمان ۰/٤ بوده و شن و ماسه به نسبت ۰/۵۸ و ۰/٤۲ با هم مخلوط شده‌اند.

سیمان مصرفی از نوع یک ردهٔ ٤۲۵ تولید کارخانه سیمان تهران است. فوق روان‌کنندهٔ NSF براساس استاندارد ASTM C 494 نوع F است و به نسبت ۱٪ وزن سیمان به مخلوط بتن اضافه گردیده است. اسلامپ بتن ۱۵ cm و اندازهٔ بزرگ‌ترین سنگ‌دانهٔ بتن ۱۲ mm می‌باشد.

به‌ازای هر بار بتن‌ریزی، ۳ نمونهٔ استوانه‌ای و ۳ نمونهٔ مکعبی گرفته شده است. بعد از ساخت نمونه‌ها، پس از ۷ روز یک نمونهٔ مکعبی و یک نمونهٔ استوانه‌ای آزمایش شده و ٤ نمونهٔ دیگر، ۲۸ روزه آزمایش شده‌اند. از فرمول ارائه شده توسط نویل [13] برای

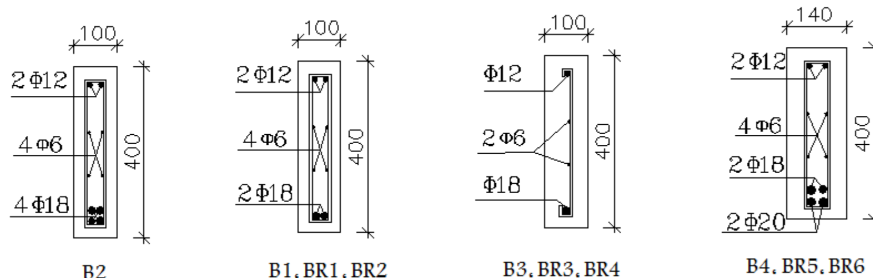
تبدیل مقاومت‌های مکعبی به استوانه‌ای استفاده شده است:

$$f_c^{'} = \left[0/76 + 0/2\log_{10}^{(\frac{f_{cu}}{19/59})}\right] f_{cu} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ بالا $f_c^{'}$ و f_{cu} به‌ترتیب مقاومت استوانه‌ای و مکعبی نمونهٔ بتنی می‌باشند. در همهٔ تیرها از یک نوع آرایش برای آرماتورها استفاده شده و با انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های ۴۰cm از میلگردها، مقاومت تسلیم آنها همانند جدول (۳) به‌دست آمده است.

ورق الیافی با مشخصاتی همانند جدول شمارهٔ (٤) از جنس کربن (CFRP) می‌باشد و الیاف آن یک‌جهته است. الیاف با نام Kor-CFW200 تولید آمریکا و بافته شده در کشور کره هستند. رزین اپوکسی با نام تجاری EPIKOTE 828 دارای چگالی ۱/۱٦ کیلوگرم بر لیتر در دمای ۲۵ درجه است و از آن در صنایع برقی و ساختمانی بهره گرفته می‌شود. سخت‌کنندهٔ مورد استفاده با نام تجاری EPIKURE F205 در چسباندن بر روی بتن در دمای اتاق می‌باشد. این محصول در دمای ۲۵ درجهٔ سانتیگراد ۱/۰٤ کیلوگرم بر لیتر چگالی دارد.

در ساخت نمونه‌های FRP دار، قبل از چسباندن CFRP ابتدا سطح مورد نظر توسط سمباده صاف شده است، سپس با استون تمیز و یک لایه رزین اپوکسی که با سخت‌کننده به نسبت ۱ به ۰/۵۸ مخلوط شده و به سطوح مورد نظر مالیده شده است. بعد از آن، ورق CFRP چسبانده شده و مجدداً یک لایه رزین دیگر به سطح ورق مالیده و به‌صورت کامل اشباع گردیده است.



شکل ۲ مقطع تیرهای ساخته شده در آزمایشگاه

جدول ۲ مصالح مورد استفاده در مخلوط بتن

مصالح	آب (kg)	سیمان (kg)	شن (kg)	ماسه (kg)	فوق روان‌کننده (liter) NSF
مقدار استفاده شده برای تهیهٔ یک مترمکعب بتن	۲۱۰	۵۲۵	۹۳۵	٦۷۳/۲	٤/٤

جدول ۳ مقاومت تسلیم آرماتورها

نمرهٔ آرماتور	آرماتور نمرهٔ ۲۰	آرماتور نمره ۱۸	آرماتور نمرهٔ ۱۲	آرماتور نمرهٔ ٦
مقاومت تسلیم (MPa)	٤۱۰	۲۷٤	۳٤۸	۸۸/٦

جدول ٤ مشخصات الیاف CFRP

ضخامت(mm)	وزن یک متر مربع(gr)	مقاومت کششی الیاف (MPa)	مدول کششی (GPa)	چگالی (gr/cm^3)
۰/۱۱۱	۲۰۰	٤۹۰۰	۲۳۰	۱/۸۰



شکل ۳ آرایش CFRP در تیر BR1



شکل ٤ آرایش CFRP در تیر BR2

آزمایش‌ها

ساخت و آزمایش تیرها فرآیندی چندمرحله‌ای است؛ به‌طوری‌که ابتدا نمونه‌های گروه اول و دوم ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و سپس برمبنای نتایج آنها نمونه‌های گروه سوم ساخته و آزمایش شده‌اند. بعد از آماده کردن تجهیزات بارگذاری (Load Cell) و تغییرمکان‌سنج‌ها(Linear Variable Differential Transformer(LVDT))، آزمایش نمونه‌ها آغاز شده و بار به‌صورت تک‌نقطه‌ای در وسط تیر و توسط جک ۱۰۰۰kN و به‌صورت استاتیکی و با سرعت بارگذاری ۳kN/s به نمونه‌ها اعمال شده است. از چهار تغییرمکان‌سنج در تمامی آزمایش‌ها استفاده شده است. یکی زیر جک بارگذاری، دومی زیر تیر و در وسط دهانه، سومی در پشت تیر و چهارمی در وجه جانبی تیر قرار داده شده است.

تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

گروه اول نمونه‌ها شامل تیرهای B1،B2،BR1 و BR2 می‌باشد که ضخامت ۱۰cm و دو سفرهٔ آرماتور دارند. تیرهایB1 و B2، نمونه‌های شاهد این گروه‌اند که در تیر B1 از دو آرماتور کششی نمره ۱۸ و در تیر B2 از ٤ آرماتور کششی نمره ۱۸ استفاده شده و هیچ تقویتی در آنها صورت نگرفته است. تیرهای BR1 و BR2 تیرهایی هستند که جزئیات آرماتوربندی مشابه B1 داشته و به دو صورت با CFRP تقویت شده‌اند. در تیر BR1 ورقهای CFRP در دو وجه روبه‌رو و پشت تیر و با ابعاد ۱۰ در ۳۰ سانتی‌متر چسبانده شده‌اند. طول ورق‌ها به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که در جهت عمود بر ترک قطری بوده و تنها در ناحیهٔ جان تیر قرار داشته باشد. در شکل (۳) آرایش CFRP در تیر BR1 نشان داده شده است.

برای تیر BR2 آرایش دیگری همانند شکل (٤) در نظر گرفته شده است. در این تیر با ادامه دادن CFRP به ناحیهٔ بال تیر، طول مهاری CFRP افزایش داده شده است. آرایش CFRP در این تیر، ۳ تفاوت عمده با تیر BR1 دارد:

۱- تقویت تنها در یک وجه تیر انجام شده است در حالی که در تیر BR1 در هر دو وجه است.

۲- در هر طرف وجه تیر از یک نوار ۱۰ سانتی بهره گرفته شده در حالی که در تیر BR1 در هر طرف از دو نوار ۱۰cm و در مجموع ۲۰cm نوار استفاده شده است.

۳- برای تیر BR1 از ۸ نوار ۱۰ cm در ۳۰cm استفاده شده ولی در اِین تیر از دو نوار ۱۰ cm در ۹۰cm بهره گرفته شده است.

در جدول و شکل (۵) به‌ترتیب نتایج حاصل از آزمایش و نحوهٔ خرابی نمونه‌ها نشان داده شده است. در همهٔ تیرهای این گروه، اولین ترک ابتدا در ناحیهٔ خمشی رخ داده است. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود بیشترین مقاومت مربوط به تیر B2 می‌باشد که در آن چهار آرماتور کششی استفاده شده است در حالی‌که سه تیر دیگر دارای دو آرماتور کششی نمرهٔ ۱۸ می‌باشند. بیشترین مقاومت بتن مربوط به نمونهٔ BR1 می‌باشد و با توجه به آن می‌توان گفت که مقاومت بیشتر نمونه BR1 نسبت به B1 به دلیل مقاومت بالای بتن آن است و نوع تقویت بکار رفته توسط CFRP تاثیری در مقاومت آن نداشته ولی وجود CFRP باعث کمتر شدن ترک، افزایش بار اولین ترک برشی به اندازه بیش از دو برابر و کاهش افت تیر به اندازه ۲۸٪ شده است. شکست نمونهٔ BR1 به صورت ترد و ناگهانی و همراه با ایجاد ضربه شدید بود که همزمان با کنده شدن CFRP از روی بتن صورت گرفت.

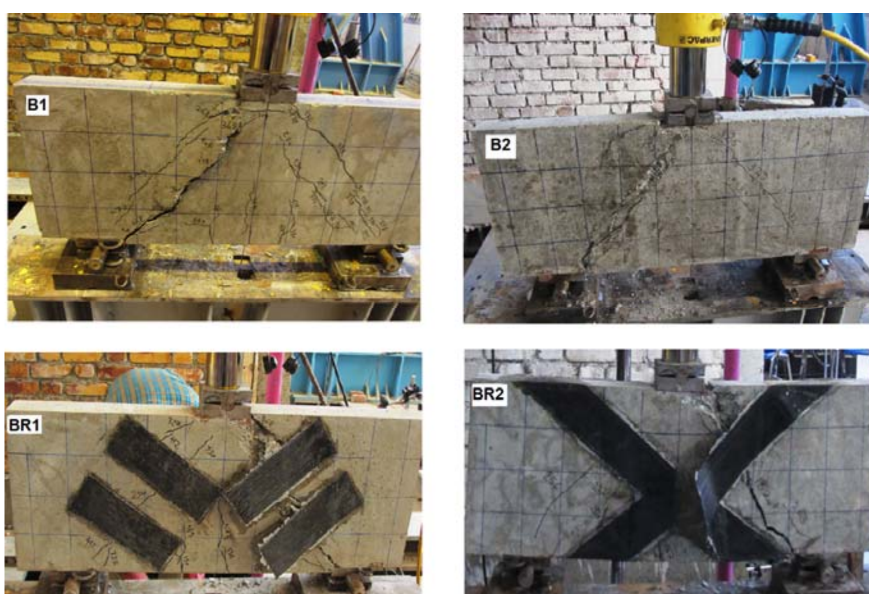
با مقایسهٔ ترک‌ها و تعداد آنها در شکل (۵) می-توان گفت که کمترین تعداد و عرض ترک‌خوردگی در تیر B2 با دو آرماتور کششی اضافی است. در تیر BR2 با وجود این‌که عرض ترک‌ها و افت تیر بسیار بیشتر از تیرهای B1 و BR1 است ولی تعداد ترک‌ها کمتر از دو تیر دیگر می‌باشد. در این تیر در باری نظیر ۳۵۳KN ، CFRP در وسط تیر پاره شد و بار به یکباره به ۳۲۰KN کاهش یافت ولی تیر دچار شکست نشد. با افزایش بیشتر بارگذاری به‌دلیل این‌که مسیر ترک‌های خمشی باز شده بود، این ترک‌ها شروع به گسترش کردند و به نظر می‌رسید که این تیر دچار شکست خمشی خواهد شد ولی با ادامهٔ بارگذاری CFRP ناحیهٔ برشی نیز به‌طور کامل جدا شد و تیر به یکباره در برش شکست. در واقع وجود CFRP باعث شده بود که از شکست برشی جلوگیری گردد ولی موقعی که جداشدگی اتفاق افتاد، شکست برشی اجتناب‌ناپذیر بود. با توجه به شکل (۵) مشخص است که استفاده از FRP باعث شده مسیر ترک‌ها عوض شود و الگوی ترک‌خوردگی تیرها تغییر کند.

از منحنی بار- افت وسط دهانه برای تیرهای گروه اول در شکل (٦) مشاهده می‌شود که با استفاده از CFRP رفتار BR2 به‌صورت خمشی- برشی تبدیل شده و FRP باعث ضعیف‌تر شدن تیر در خمش گردیده است. در تیر BR1 نیز استفاده از CFRP باعث تغییرات چندانی در مقاومت نهایی تیر نشده است. در مجموع می‌توان گفت که استفاده از این دو آرایشFRP علی‌رغم تغییر دادن الگوی ترک‌خوردگی تیر، باعث افزایش مقاومت تیرها نشده است.

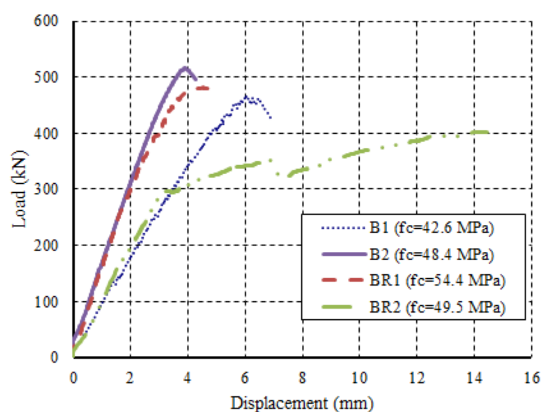
تیرهای گروه دوم جزئیاتی مشابه گروه اول دارند که تنها به‌جای دو سفرهٔ آرماتور، یک سفرهٔ آرماتور جاگذاری شود تا ظرفیت خمشی و برشی تیر کمتر شده و پوشش بتن روی آرماتورها اضافه گردد. تیر سادهٔ B3، نمونهٔ شاهد این گروه بوده است و دو نمونهٔ مقاوم‌شدهٔ BR3 و BR4 به‌ترتیب مشابه تیرهای BR1 و BR2 گروه اول با CFRP تقویت شده‌اند. نتایج مربوط به آزمایش این گروه در جدول (٦) نشان داده شده است که نشان می‌دهد استفاده از هر دو آرایش FRP باعث افزایش بار ترک‌خوردگی و افت وسط تیرها شده است.

جدول ٥ نتایج حاصل از آزمایش گروه اول تیرها

نام و نمونه تیر	مقاومت استوانه‌ای بتن (MPa) (نسبت مقاومت‌ها به B1)	بار ترک‌خوردگی تیر (kN) (نسبت بار به B1)	بار اولین ترک برشی (kN) (نسبت بار به B1)	بار نهایی تیر (kN) (نسبت بار به B1)	افت وسط تیر (mm) (نسبت افت به B1)	مود شکست تیر
B1	٤٢/٦ (١)	١٢٠ (١)	١٣٨ (١)	٤٦٧ (١)	٦/٠٤ (١)	برشی
B2	٤٨/٤ (١/١٤)	٢٥٠ (٢/٠٨)	٢٨٣ (٢/٠٥)	٥١٦ (١/١٠)	٣/٩٠ (٠/٦٤)	برشی
BR1	٥٤/٤ (١/٢٧)	١٣٨ (١/١٥)	٢٩٤ (٢/١٣)	٤٨١ (١/٠٣)	٤/٢١ (٠/٧٠)	برشی
BR2	٤٩/٥ (١/١٦)	١٦٧ (١/٣٩)	١٨٢ (١/٣٢)	٤٠٣ (٠/٨٦)	١٤/٣٥ (٢/٣٧)	برشی



شکل ٥ نحوه خرابی نمونه‌های گروه اول



شکل ٦ منحنی بار– افت وسط دهانه تیرهای گروه اول

جدول ٦ نتایج حاصل از آزمایش گروه دوم تیرها

نام نمونه تیر	مقاومت استوانه‌ای بتن (MPa) (نسبت مقاومتها به B3)	بار ترک‌خوردگی تیر (kN) (نسبت بار به B3)	بار اولین ترک برشی (kN) (نسبت بار به B3)	بار نهایی تیر (kN) (نسبت بار به B3)	افت وسط تیر (mm) (نسبت افت به B3)	مود شکست تیر
B3	٤٢/٦ (١)	٦٠ (١)	١٠١ (١)	٣٨٠ (١)	٨/٨٧ (١)	برشی
BR3	٥٤/٤ (١/٢٨)	٦٦ (١/١٠)	٢٢٠ (٢/١٨)	٣٥١ (٠/٩٢)	١٣/٩١ (١/٥٧)	برشی
BR4	٤٧/٩ (١/١٢)	١١٤ (١/٩٠)	١٤٣ (١/٤١)	٢٨٢ (٠/٧٤)	١٦/٩٧ (١/٩١)	برشی







شکل ۷ نحوه خرابی گروه دوم نمونه‌ها

شکل (۷) نحوۀ خرابی تیرهای این گروه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این گروه به‌دلیل تک سفره‌ای بودن نمونه‌ها، ظرفیت خمشی تیرها نیز پایین است و تعداد و عرض ترک‌های خمشی خیلی بیشتر از نمونه‌های گروه اول می‌باشد. در هر سه تیر این گروه تا آخرین لحظات بارگذاری هم ترک‌های خمشی و هم برشی در حال رشد بودند.

تیر BR3 دچار شکست ناگهانی برشی شد؛ به‌گونه‌ای که علی‌رغم افت زیاد تیر نسبت به نمونۀ معمولی، مقاومت نهایی آن به اندازۀ ۳۰kN کمتر از نمونۀ معمولی شده. دلیل این امر تغییر الگوی ترک‌خوردگی تیر و انتقال بار از برش به مسیر خمشی و رفتار خمشی تیر است. چنانچه ورق‌های FRP تا لحظۀ وقوع شکست از روی بتن جدا نمی‌شدند انتظار می‌رفت که BR3 در خمش خراب شود، ولی با جدا شدن FRP موجود در ناحیۀ برشی و ضعیف‌تر شدن این ناحیه، به یک‌باره انرژی فوق‌العاده‌ای به ناحیۀ ضعیف برشی منتقل شد و تیر با ضربه و به‌صورت ناگهانی در برش شکست.

در تیر BR4 تعداد ترک‌ها به‌مراتب کمتر بود و با افزایش بار، عرض ترک‌های قبلی بیشتر و بیشتر

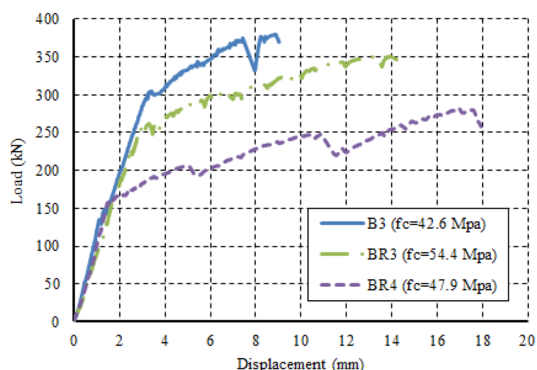
می‌شد. در باری معادل CFRP،۲٤۷kN در ناحیهٔ پایین تیر پاره شد و افت شدیدی در بار مشاهده شد ولی تیر خراب نشد. با افزایش بیشتر بار، عرض ترک‌های خمشی و برشی بیشتر و بیشتر شد و تا لحظهٔ شکست نمونه احتمال وقوع هر دو شکست خمشی و برشی می‌رفت که در نهایت نمونه با شکست برشی مواجه شد. در این تیر نیز همانند BR3 مود رفتاری تیر به‌صورت خمشی- برشی بود و به‌کارگیری FRP باعث ضعف تیر در خمش شده بود.

در شکل (۸) منحنی بار – افت وسط دهانهٔ تیرها نشان داده شده است. در این منحنی افت‌های شدیدی در بار دیده می‌شود که به‌دلیل جداشدگی مرحله‌ای CFRP از روی تیر در جاهای مختلف تیر می‌باشد. مشاهده می‌شود که در این گروه از تیرها نیز استفاده از دو آرایش قبلی مقاومت تیرها را افزایش نداده ولی باعث افزایش شکل‌پذیری تیر شده است.

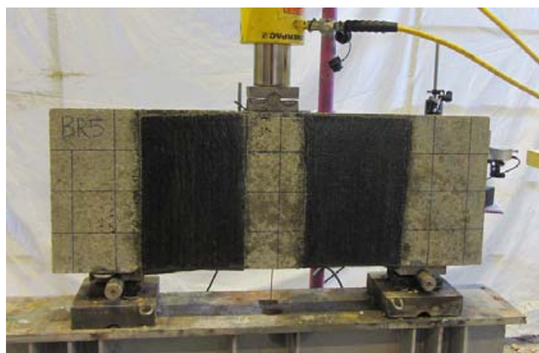
ساخت و آزمایش تیرهای گروه سوم بعد از آزمایش دو گروه قبلی و بر مبنای نتایج آنها صورت گرفته است. با توجه به این‌که دو آرایش قبلی در افزایش مقاومت تیرها کارآیی چندانی نداشتند، در این گروه از دو آرایش جدید CFRP استفاده گردیده است. به‌طوری که ضخامت تیر از ۱۰ cm به ۱٤cm افزایش داده شده و از دو آرماتور کششی نمرهٔ ۲۰ به‌اضافهٔ دو آرماتور کششی نمرهٔ ۱۸ برای افزایش مقاومت خمشی آن استفاده شده است. B4، نمونهٔ شاهد تقویت نشده این گروه است و تیرهای BR5 و BR6 با جزئیات آرماتوربندی مشابه B4 با CFRP تقویت شده‌اند.

تیر BR5 توسط ورق‌های CFRP به‌صورت U همانند شکل (۹) تقویت شده است. در استفاده از FRP برای مقاوم‌سازی، معمولاً قسمت بالایی تیر توسط عضوی که روی تیر قرار گرفته پوشانده شده است و امکان قرار دادن FRP در بالای تیر وجود ندارد. به همین دلیل برای عملی‌تر شدن ایدهٔ تقویت، به‌جای دورپیچ کردن تیر از آرایش U شکل استفاده شده است.

در تیر BR6 باز هم از آرایش عمود بر قطر برشی استفاده شده ولی این بار، تعداد باند CFRP بیشتر شده و عرض آنها به ٥cm تقلیل یافته است. تقویت در این تیر فقط در یک وجه صورت گرفته است. گوشه‌های تیز تیر به‌صورت گرد درآورده شده‌اند تا از تمرکز تنش در این نواحی جلوگیری شود. آرایش FRP تیر BR6 در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۸ منحنی بار- افت وسط دهانهٔ تیرهای گروه دوم



شکل ۹ آرایش CFRP در تیر BR5



شکل ۱۰ آرایش *CFRP* در تیر *BR6*

جدول ۷ نتایج حاصل از آزمایش گروه سوم تیرها

نام نمونهٔ تیر	مقاومت استوانه‌ای بتن (MPa) (نسبت مقاومت‌ها به B4)	بار ترک‌خوردگی تیر (kN) (نسبت بار به B4)	بار اولین ترک برشی (kN) (نسبت بار به B4)	بار نهایی تیر (kN) (نسبت بار به B4)	افت وسط تیر (mm) (نسبت افت به B4)	مود شکست تیر
B4	٤٦/٤ (١)	٣٨١ (١)	٣٨١ (١)	٥٧٦ (١)	٣/٠٢ (١)	برشی
BR5	٤٨ (١/٠٣)	برشی زیر FRP	زیر FRP	٦١٠ (١/٠٦)	٣/٦٩ (١/٢٢)	برشی
BR6	٤٨ (١/٠٣)	٣٦٠ (٠/٩٤)	٣٦٠ (٠/٩٤)	٦٢٢ (١/٠٨)	٤/٤٠ (١/٤٦)	برشی

در جدول (۷) نتایج آزمایش نمونه‌های گروه سوم و در شکل (۱۱) نحوهٔ خرابی تیرهای گروه سوم نشان داده شده است. در این گروه، هر سه تیر دارای مقاومت بتن تقریباً یکسانی بودند. اولین ترک مشاهده شده در تیرهای این گروه به‌صورت برشی بود.

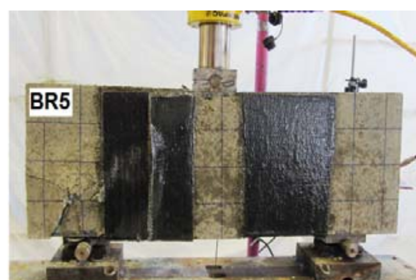
از روی شکل (۱۱) مشخص است که شکست هر سه تیر به‌صورت برشی است. تیر B4 به‌دلیل داشتن بتن با ضخامت بیشتر نسبت به نمونه‌های ۱۰ سانتی قبلی دچار ترک‌خوردگی کمتری شده است. در این نمونه اولین ترک، به‌صورت برشی و در باری حدود ۳۸۱kN قابل مشاهده بود. تشکیل عضو فشاری قطری بتنی در این نمونه به‌خوبی مشهود است. همان‌طور که انتظار می‌رفت به‌خاطر مقاومت خمشی و برشی بالای این نمونه نسبت به نمونه‌های مشابه ۱۰cm قبلی، افت

تیر نیز کمتر بود.

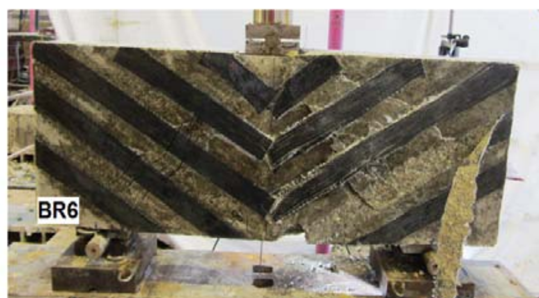
تیرBR5 خرابی برشی به‌همراه لهیدگی یکی از تکیه‌گاه‌ها را تجربه کرد. در این تیر تا قبل از پاره شدن FRP مقاومت تیر در حال افزایش بود که به یک‌باره بعد از پاره شدن FRP، ترک برشی در زیر FRP ایجاد شد و با ادامهٔ بارگذاری، لهیدگی تکیه‌گاهی روی داد. افزایش مقاومت این نمونهٔ نسبت به نمونه بدون FRP در حدود ٦٪ بود.

در تیر BR6 خرابی به‌صورت تدریجی بود، به‌طوری که با پاره شدن یا جدا شدن هر باند FRP به‌دلیل مقاومت دیگر باندها نمونه دچار خرابی نمی‌شد و تا پاره شدن آخرین باند مقاوم، نمونه دارای مقاومت بود. نمونه با جدا شدن باند قطری وسط وارد فاز خرابی شد. اصلی‌ترین و کارآمدترین باند، دومین باند از پایین بود که با توجه به این‌که در هر دو سمت تا وجه تیر نیز ادامه داشت دارای مقاومت بیشتری بود. اولین باند از پایین نیز دارای چنین حالتی بود ولی با توجه به محل قرارگیری آن، تحت تنش‌های کمتری قرار داشت. سه باند دیگر فقط در وجه تیر چسبانده شده بودند و با جداشدن از روی تیر نقش خود را در افزایش مقاومت از دست دادند. این تیر در بار ٦٢٢ kN شکست که ٨٪ بیشتر از بار خرابی تیر ساده B4 بود.

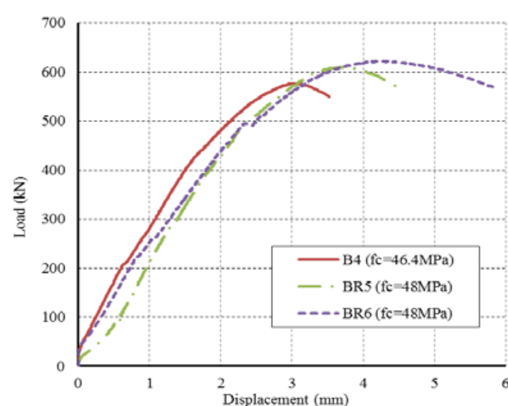
در شکل (١٢) منحنی بار- افت نمونه‌های B4، BR5 و BR6 نشان داده شده است. از روی شکل مشخص است که استفاده از FRP باعث افزایش مقاومت تیر شده که این افزایش برای تیر BR5 به اندازهٔ ٦٪ و برای تیر BR6 ٨٪ است. هم‌چنین شکل‌پذیری نمونهٔ BR6 بیشتر از دو تیر دیگر می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که تقویت صورت گرفته در تیر BR6 تنها در یک وجه تیر می‌باشد در حالی که حالت U شکل استفاده شده در تیر BR5 در دو وجه تیر چسبانده شده است. در صورت تقویت هر دو وجه تیر همانند آرایش به‌کار رفته در تیر BR6 می‌توان انتظار داشت که به مقاومت بالاتری دست یافته شود. به‌شرطی که مقاومت خمشی تیر به‌اندازه‌ای بزرگ باشد که مسیر انتقال بارها عوض نشود.







شکل ١١ نحوه خرابی نمونه‌های گروه سوم



شکل ۱۲ منحنی بار- افت وسط دهانه تیرهای گروه سوم

جدول ۸ مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و روابط تحلیلی

نام نمونه تیر	ضخامت تیر b (mm)	مقاومت فشاری بتن f'_c (MPa)	بار نهایی آزمایشگاهی P_{ex} (kN)	بار نهایی بدست آمده از روابط تحلیلی (kN) (نسبت بار تحلیلی به آزمایشگاهی)					
				مبحث نهم مقررات ملی [۱۲]	ACI ۳۱۸ [14]	کنگ و همکاران [15]	مائو و سو [16]	عربزاده و همکاران [17]	ژانگ و همکاران [3]
B1	۱۰۰	٤۲/٦	٤٦۷	۲۲۹/۷ (۰/٤۹)	۲۳۸/٥ (۰/٥۱)	۳٦٤/٦ (۰/۷۸)	۲٦٦/٥ (۰/٥۷)	۲٤۹/۹ (۰/٥۳)	۱٦۰/۱ (۰/۳٤)
B2	۱۰۰	٤۸/٤	٥۱٦	۲۳۳/۸ (۰/٤٥)	۲٤۲/۷ (۰/٤۷)	۳۸٦/٥ (۰/۷٥)	۲۸۱ (۰/٥٤)	۲٥۸/۹ (۰/٥۰)	۱٦۰/۱ (۰/۲۹)
B3	۱۰۰	٤۲/٦	۳۸۰	۱۷٥/۱ (۰/٤٦)	۱۷۳/۳ (۰/٤٥)	۳٤۸/۳ (۰/۹۲)	۱۸٦/٥ (۰/٤۹)	۲٤۹/۹ (۰/٦٦)	۸۰ (۰/۲۱)
B4	۱٤۰	٤٦/٤	٥۷٦	۳۰۹/۲ (۰/٥٤)	۳۰٦/٤ (۰/٥۳)	۳۸۹/۹ (۰/٦۸)	۳۲۲/٤ (۰/٥٦)	٤۳۷/٦ (۰/۷٦)	۱٦۰/۱ (۰/۲٦)
BR1	۱۰۰	٥٤/٤	٤۸۱	X	X	X	X	X	۱٦۹/۳ (۰/۳٥)
BR2	۱۰۰	٤۹/٥	٤۰۳	X	X	X	X	X	۱٦۱/۳ (۰/٤۰)
BR3	۱۰۰	٥٤/٤	۳٥۱	X	X	X	X	X	۸۸/۱ (۰/۲٥)
BR4	۱۰۰	٤۷/۹	۲۸۲	X	X	X	X	X	۸۱/۲ (۰/۲۹)
BR5	۱٤۰	٤۸	٦۱۰	X	X	X	X	X	۲۲۱/۳ (۰/۳٦)
BR6	۱٤۰	٤۸	٦۲۲	X	X	X	X	X	۱٦۷/۱ (۰/۲۷)

توجه: اعداد داخل پرانتز نسبت بار تحلیلی به بار آزمایشگاهی می‌باشند.

مقایسهٔ نتایج

در این بخش نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از روابط موجود در مراجع دیگر مقایسه شده است. برای مقایسهٔ نتایج تیرهای عمیق معمولی از مبحث نهم مقررات ملی [۱۲]، آیین‌نامهٔ ACI318-99 [14]، رابطهٔ ارائه شده توسط کنگ و همکاران [15]، رابطهٔ پیشنهادی مائو و سو [16] و رابطهٔ پیشنهادی محقق و همکاران [17] استفاده شده است.

در مورد تیرهای عمیق مقاوم‌شده با FRP، به‌طور کلی آیین‌نامه‌ای وجود ندارد که به‌طور اخص برای تیر عمیقی که با FRP تقویت شده، رابطه‌ای ارائه داده باشد. آیین‌نامهٔ ACI 440.2R-08 [18] رابطهٔ مقاومت برشی ناشی از FRP را ارائه نموده و برای محاسبهٔ مقاومت ناشی از بتن و فولاد در تیرهای معمولی به آیین‌نامهٔ ACI 318-05[۱۹] ارجاع داده است. نشریهٔ ۳٤۵ ایران [۲۰] نیز وضعیت مشابهی دارد و در آن تنها به مقاوم‌سازی تیرهای معمولی با FRP پرداخته شده است. بنابراین نمی‌توان از آیین‌نامهٔ ACI 440.2R-08 [18] و نشریهٔ ۳٤۵ ایران [۲۰] برای مقایسهٔ نتایج تیرهای عمیق تقویت شده با FRP استفاده کرد.

چند رابطه نیز توسط محققان برای محاسبهٔ مقاومت برشی تیرهای عمیق مقاوم شده در مراجع پیشنهاد شده‌اند که شامل رابطهٔ پیشنهادی ژانگ و همکاران [13]، معاداوی و شریف [8] و پارک و ابوطاها [9] می‌باشند. رابطهٔ پیشنهادی ژانگ و همکاران بر مبنای رابطهٔ پیشنهادی مائو و سو [16] قرار دارد. تحقیق انجام شده توسط معاداوی و شریف [8] برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای عمیق دارای بازشوی مقاوم‌شده با FRP است و رابطهٔ پیشنهادی برای تیرهای بدون بازشو صادق نیست. رابطهٔ پیشنهادی پارک و ابوطاها [9] هم تنها برای حالتی است که از نوار FRP به‌صورت U شکل با نوارهایی به عرض کم استفاده شود.

در جدول (۸) مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی با نتایج روابط موجود انجام شده است. تمامی تیرها دارای دهانهٔ ۸۰۰ mm و ارتفاع ٤۰۰mm می‌باشند.

مشاهده می‌شود که در تمامی تیرها بار نهایی آزمایشگاهی بیشتر از تحلیلی است. به‌طور کلی مقداری از بالا بودن بار نهایی آزمایشگاهی به بار تحلیلی مربوط به تقویت‌های صورت گرفته در محل‌های اعمال بار و تکیه‌گاه‌هاست که برای جلوگیری از وقوع خرابی لهیدگی تعبیه شده‌اند که اندکی به مقاومت برشی نمونه نیز اضافه می‌کند.

در روابط تحلیلی مربوط به تیرهای عمیق معمولی در جدول، رابطه کنگ و همکاران [15] دارای بهترین جواب می‌باشد. دلیل بهتر بودن جواب‌های آن، بیشتر فرض کردن مقاومت ناشی از بتن نسبت به سایر روابط است. نتایج به‌دست آمده از مبحث نهم و آیین‌نامهٔ ACI318-99 خیلی محافظه‌کارانه می‌باشد. زیرا روابط آیین‌نامه‌ای در جهت اطمینان دست بالا در نظر گرفته می‌شوند و اثرات ناشی از قفل و بست دانه‌ای و آرماتورهای کششی در داخل اثرات ناشی از بتن و فولاد در رابطه مقاومت برشی گنجانده شده‌اند. رابطهٔ محقق و همکاران [17] نیز دارای جواب‌های خوبی است و اصلی‌ترین دلیل محافظه‌کارانه شدن جواب‌های آن نسبت به رابطهٔ کنگ و همکاران، بسیار ناچیز فرض کردن مقاومت ناشی از فولاد جان (حدود ۱٪) است.

در مورد تیرهای عمیق مقاوم‌شده با FRP تنها رابطه رابطهٔ پیشنهادی ژانگ و همکاران [3] است که از تعمیم رابطهٔ پیشنهادی مائو و سو [16] برای تیرهای عمیق معمولی به‌دست آمده است، ولی دارای نتایج بسیار محافظه‌کارانه‌ای است. هم‌چنین رابطهٔ پیشنهادی ژانگ و همکاران [3] در حالت تیر عمیق ساده، مستقل از مقاومت بتن، ضخامت تیر و ارتفاع تیر است. جواب‌های به‌دست آمده از آن برای حالت تقویت شده با FRP نیز خیلی محافظه‌کارانه است. با توجه به جدول شمارهٔ ۸ مشاهده می‌شود که با استفاده از این رابطه، به‌کارگیری آرایش‌های موردنظر در این تحقیق

باعث افزایش مقاومت برشی تیر شده است در حالی که نتایج آزمایشگاهی برای تعدادی از آرایش‌ها خلاف آن را نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان گفت که این رابطه بایستی اصلاح شود.

نتیجه‌گیری

بررسی آزمایشگاهی ۱۰ تیر عمیق ساده و مقاوم‌شده با CFRP نشان داد که برای دستیابی به حالتی که CFRP باعث افزایش مقاومت تیر شود، بایستی مقدار و آرایش CFRP در تیر به‌گونه‌ای باشد که مسیر برشی حتی بعد از تقویت با FRP ضعیف‌تر از مسیر خمشی برای انتقال بار باشد. به عبارت دیگر اثر FRP در افزایش مقاومت برشی تیرهایی قابل مشاهده است که تیر دارای مقاومت خمشی کافی باشد.

هم‌چنین بایستی از آرایشی استفاده گردد که کشش ایجاد شده در سیستم FRP به‌صورت تدریجی اعمال گردد. برای ایجاد چنین حالتی استفاده از باندهای FRP به تعداد بیشتر و با عرض کمتر ایده خوبی است.

در نشریهٔ ۳۴۵ برای تقویت برشی هیچ اشاره‌ای به تیرهای عمیق نشده است. در حالی‌که به‌دلیل شکست برشی تیرهای عمیق، تقویت برشی آنها از اهمیت دوچندانی برخوردار است. در نشریهٔ فرض شده که تقویت برشی همانند به‌کارگیری خاموت در سرتاسر طول تیر انجام می‌گیرد ولی در تیرهای عمیق تعیین‌کننده‌ترین محل برای برش، دهانهٔ برشی و محل ترک‌های قطری است. این نشریه دارای محدودیت‌های فراوانی است و کلیهٔ حالات تقویت را در نظر نگرفته است.

بر مبنای آزمایش‌های انجام شده و مقایسهٔ نتایج با روابط موجود، مشخص شد که هیچ‌کدام از روابط موجود در مراجع مورد بررسی، پیش‌بینی درستی از رفتار تیرهای عمیق مقاوم‌شده با FRP آزمایش شده در این مقاله را ندارند.

مراجع

1. Chaallal, O., Nollet, M-J., and Saleh, K., "Use of CFRP Strips for Flexure and Shear Strengthening of RC Members", *Proc., 2nd Conf. on Composites in Infrastructure*, H. Saadatmanesh, and M. R. Ehsani, eds., Univ. of Arizona, Tucson, Ariz. pp. 249-260, (1998).
2. Fanning, P., and Kelly, O., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams: An Experimental Study Using CFRP Plates", *Proc., 8th Int. Conf. on Structural Faults and Repair*, M. C. Forde, ed., Meigle Printers Ltd., Tweedbank Industrial Estate, Galashiels, Scotland, London, (1999).
3. Zhang, Z., Hsu, C.T. and Moren, J., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Deep Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates", *Journal of Composites for Construction*, vol. 8, No. 5, pp. 403-414, (2004).
4. Islam, M.R., Mansur, M.A, and Maalej, M., "Shear Strengthening of RC Deep Beams Using Externally Bonded FRP Systems", *Elsevier, Cement & Concrete Composites*, vol. 27, pp. 413-420, (2005) .
5. Parvin, A., Moslehy, Y., "A Study on the Design of Deep Beams Using FRP Bars", *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, Cincinnati, vol. 52, (2007).
6. Ahmad, I., Zhu, Z. and Mirmiran, A., "Behavior of Short and Deep Beams Made of Concrete-filled

Fiber-Reinforced Polymer Tubes", *Journal of Composites for Construction*, vol. 12, No. 1, pp. 102-110, (2008).

7. Omeman, Z., Nehdi, M. and El-Chabib, H., "Experimental Study on Shear Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Short Beams without Web Reinforcements", *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 35, No. 1, pp. 1-10, (2008).
8. Maaddawy, T.E., Sherif, S., "FRP Composites for Shear Strengthening of Reinforced Concrete Deep Beams with Openings", *Elsevier, Composite Structures*, vol. 89, pp.60–69, (2009).
9. Park, S., Aboutaha, R.S., "Strut-and-Tie Method for CFRP Strengthened Deep RC Members", *Journal of Structural Engineering © ASCE*, vol. 135, No. 6, pp. 632-643, (2009).
10. Lee, H.K., Cheong, S.H., Ha, S.K., and Lee, C.G., "Behavior and Performance of RC T-section Deep Beams Externally Strengthened in Shear with CFRP Sheets", *Composite Structures*, vol. 93, No. 2, pp. 911-922, (2011).
11. Andermatt, M.F., "Concrete Deep Beams Reinforced with Internal FRP", MSc. Thesis, University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, pp. 266 (2010)

۱۲. مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، « طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه»، وزارت راه و شهرسازی، معاونت امور مسکن و شهرسازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان، صفحه ۳۷۱، (۱۳۹۲).

13. Neville, A.M., "General Relation for Strength of Concrete Specimens of Different Shapes and Sizes," *ACI J.*, Proceeding, vol.63, No.10, pp. 1095-1109, (1966).
14. ACI 318-99, "Building Requirements for Structural Concrete and Commentary", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp 393, (1999).
15. Kong, F.K., Robin, P.J., Singh, A., and Sharp, G.R., "Shear Analysis and Design of Reinforced Concrete Deep Beams", *The Structural Engineer*, vol.50 No.10, pp. 405-409, (1972).vol?
16. Mau S.T. and Hsu T.T.C., "Formula for the Shear Strength of Deep Beams", *ACI Structural Journal*, vol. 86, No.5, pp 516-523, (1989).
17. Arabzadeh, A., Rahaie, A.R. and Aghayari, R., "A Simple Strut-and-Tie Model for Prediction of Ultimate Shear Strength of RC Deep Beams", *International Journal of Civil Engineering*, vol.7, No, 3, pp. 141-153, (2009).
18. ACI 440.2R-08, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", Reported by ACI Committee 440, pp 80, (2008).
19. ACI 318-05, "Building Requirements for Structural Concrete and Commentary", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp 471, (2005).

۲۰. نشریهٔ شماره ۳٤٥ «راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی به‌سازی ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP» سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، صفحه ۱۰۷ ، (۱۳۸٥).